DOI: 10.24850/j-tyca-14-03-02

Artículos

Composición isotópica de la precipitación en el Valle de Querétaro, México

Isotopic composition of precipitation in Valle de Querétaro, Mexico

Luis González-Hita[1]

Miguel A. Mejía-González[2]

Blanca Carteño-Martinez[3]

Juan C. Aparicio-González[4]

Dustin S. Mañon-Flores[5]

[1]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Jiutepec, Morelos, México, lghita@tlaloc.imta.mx

[2]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Jiutepec, Morelos, México, mamejia@tlaloc.imta.mx

[3]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Jiutepec, Morelos, México, blancartmart@hotmail.com

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[4]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Jiutepec, Morelos, México, jcapariciog@gmail.com

[5]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Jiutepec, Morelos, México, pistolpiolo@gmail.com

Autor para correspondencia: Miguel Ángel Mejía-González, mamejia@tlaloc.imta.mx

Resumen

El uso de los isótopos estables del agua para determinar la relación entre la precipitación y la recarga/descarga del agua subterránea ha sido limitado en México. Una de las principales limitaciones es la falta de monitoreo de los isótopos estables de la lluvia. Este estudio presenta la caracterización de la composición isotópica ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, Exceso-d) del agua meteórica ocurrida en el Valle de Querétaro de septiembre de 2017 a julio de 2021. Los análisis de isótopos estables se realizaron en el laboratorio de hidrología isotópica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), utilizando analizadores láser Picarro L2110-i y Los Gatos Research LWIA-45EP. Por medio de una regresión lineal de mínimos cuadrados de los datos isotópicos se determinó la línea de agua meteórica del valle de Querétaro (LAMVQ), $\delta^{2}H = 7.65\ \delta^{18}O + 6.97$. Esta línea tiene una pendiente y un intercepto menor al de la línea meteórica mundial (LMM). Los datos mostraron que los valores de la pendiente, del intercepto y del

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

exceso de deuterio (d) dependen de la cantidad de lluvia. La LAMVQ tiene una pendiente e intercepto menor al de la LMM debido a evaporación secundaria de las precipitaciones pequeñas (< 30 mm mensual). Este colector forma parte de la Red Nacional de Monitoreo de la Composición Isotópica de la Precipitación Pluvial (RENIP), que el IMTA instaló en diversas provincias fisiográficas del país.

Palabras clave: lluvia, isótopos estables, línea meteórica de Querétaro, evaporación secundaria, Red Nacional de Monitoreo de la Composición Isotópica de la Precipitación.

Abstract

Stable isotopes monitoring of rainfall in México has been limited. This study presents the characterization of the isotopic composition ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, Excess-d) of meteoric water that occurred in the Querétaro Valley from September 2017 to July 2021. Laser water isotope analyzers Picarro L2110-i and Los Gatos Research LWIA-45EP were used to carry out the stable isotope analyses. The local meteoric water line was obtain using a least squares regression of the isotope data, $\delta^{2}H = 7.65\ \delta^{18}O + 6.97$. This Line has a slope and an intercept lower than the World Meteoric Line (LMM). The data show that the Local Meteoric Line has a lower slope and intercept than the LMM, due to secondary evaporation of small rainfall (< 30 mm per month). This collector forms part of the National Network for Monitoring the Isotope Composition of Rain that the Mexican Institute of Water Technology installed in various physiographic provinces of the country.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Keywords: Rain, stable isotopes, meteorological line of Querétaro, Secondary evaporation, national network for monitoring the isotope composition of rain.

Recibido: 24/11/2021

Aceptado: 23/06/2021

Introducción

Los isótopos estables de hidrógeno y oxígeno incorporados en las moléculas del agua de la precipitación son una herramienta muy importante para estudiar el origen y la dinámica del agua superficial y subterránea (Bowen & Good, 2015; Eastoe, Hess, & Mahieux, 2015; Ouysse, Wehncke, & Carrillo-Rivera, 2018; Sánchez-Murillo *et al*., 2019). Para caracterizar la variabilidad isotópica en la precipitación a escala global y regional, la Agencia de Energía Atómica Internacional, en conjunto con la Organización Meteorológica Mundial, implementaron la Red Global de Isótopos en la Precipitación (Schotterer, Oldfield, & Froehlich, 1996). La red comenzó a funcionar desde 1960, recolectando datos isotópicos y meteorológicos, hasta el día de hoy. En México

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

operaron dos estaciones: una en la ciudad de Chihuahua y otra en la ciudad de Veracruz, de 1962 a 1988.

El uso de los isótopos estables del agua para determinar la relación entre la precipitación y la recarga/descarga del agua subterránea ha sido limitado en México. Una de las principales limitaciones es la falta de monitoreo de los isótopos estables de la lluvia. Se han realizado algunos estudios recientes sobre el tema, sin embargo aún falta información de muchas zonas del país. Uno de estos estudios fue el realizado por Aguilar-Ramírez, Camprubí, Fitz-Díaz, Cienfuegos-Alvarado y Morales-Puente (2017) en el centro-noreste de la Sierra Madre Oriental. La época de recolección del agua pluvial fue la temporada de lluvias del año 2012, entre los meses de julio y octubre. La línea de agua meteórica local que determinaron está definida por la ecuación $\delta^2H = 8.15 * \delta^{18}O + 15$. Como se puede notar en la ecuación, tanto la pendiente (8.15) como el intercepto (15) son superiores a los valores de la línea meteórica mundial (8, 10). Es muy probable que esto se deba a que el muestreo se realizó solamente en la temporada de lluvias. Es recomendable un muestreo en la temporada de estiaje, para verificar si tales valores se mantienen o disminuyen. Otro de los estudios fue llevado a cabo por Cejudo, Acosta-González y Leal-Bautista (2021) en la península de Yucatán (Campeche, Quintana Roo y Yucatán). El periodo de estudio abarcó de noviembre de 2018 a noviembre de 2019. La línea de agua meteórica regional que encontraron fue $\delta^2H = 7.803\ \delta^{18}O + 12.075$. De acuerdo con Putman, Fiorella, Bowen y Cai (2019), para definir con precisión una línea meteórica local se requieren al menos cuatro años de observaciones. Para

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

el caso de la península de Yucatán, se necesitan más años de monitoreo para una mejor definición de la línea meteórica.

Ejemplos en México de la aplicación de los isótopos estables del agua pluvial son la línea de agua meteórica de la Ciudad de México (Cortés & Farvolden, 1989; Cortés, Durazo, & Farvolden, 1997), la cual coadyuvó para determinar el origen de la salinidad del agua subterránea (Ortega-Guerrero, Cherry, & Aravena, 1997) y estudiar la hidrogeología del acuífero profundo (Morales-Casique, Escolero, & Arce, 2014); la línea de agua meteórica de Quintana Roo, que ayudó a interpretar la información paleoclimática de las estalagmitas de las cuevas del río Secreto (Lases-Hernandez, Medina-Elizalde, Burns, & DeCesare, 2019) y la línea de agua meteórica de Baja California Sur, que permitió determinar las fuentes de recarga de los acuíferos costeros (González-Hita, Mejía-González, Martinez-Carteño, Aparicio-González, & Flores-Mañón, 2021).

Los objetivos del estudio fueron los siguientes: 1) la caracterización de la composición isotópica ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, Exceso-d) del agua meteórica ocurrida en el Valle de Querétaro de septiembre de 2017 a julio de 2021; 2) determinar la línea de agua meteórica del valle de Querétaro, y 3) identificar los procesos que controlan la pendiente y el intercepto de la línea meteórica.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Área de estudio

El valle de Querétaro se localiza en la parte central de la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana (INEGI, 1997) (Figura 1). Este valle es el producto de una serie de acontecimientos que tuvo lugar desde fines del Cretácico hasta principios del Terciario, entre ellos la Revolución Laramide, que originó la dislocación y plegamiento de las rocas sedimentarias marinas, dando lugar a la formación de sierras y fallas. Posteriormente, nuevas fracturas y fallas originaron pilares y fosas tectónicas asociadas con la actividad volcánica, que se rellenaron con sedimentos aluviales, flujos de lava y depósitos volcanoclásticos lacustres (Conagua, 2015).

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Figura 1. Localización del Valle de Querétaro.

Es un extenso valle de forma alargada en dirección norte-sur, en el cual se presentan topoformas de sierras, lomeríos y llanuras con altitudes entre 1 800 y 2 390 m (INEGI, 1997). La elevación más importante es el Cimatario (2 390 m).

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Características climáticas

El clima predominante es el semiseco-semicálido, la temperatura promedio anual es de 19 °C, y la precipitación promedio anual es de 549 mm (INEGI, 1997). La precipitación es más abundante de junio a octubre, es decir, típicamente de verano (Reyna, 1970). En ocasiones se presenta en la mitad de la estación lluviosa una época menos húmeda, que se conoce como sequía intraestival o canícula (Reyna, 1970). La Figura 2 y Figura 3 muestran, respectivamente, el comportamiento de la temperatura y la precipitación media mensual.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

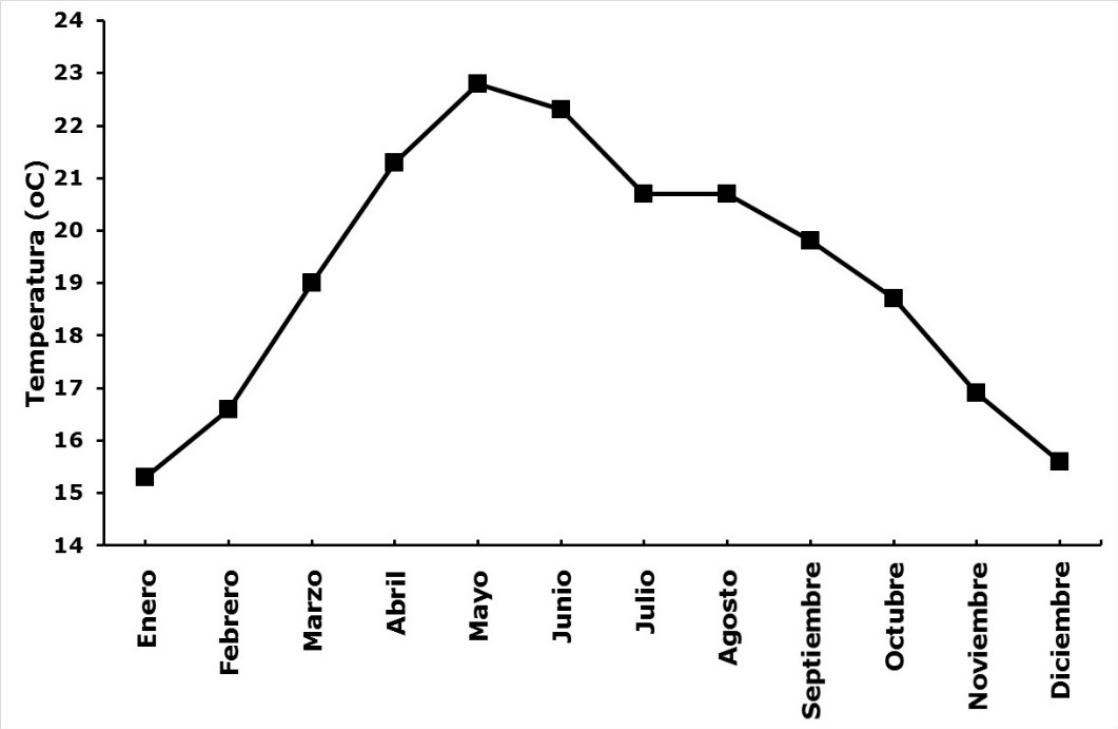

Figura 2. Comportamiento de la temperatura media mensual del valle de Querétaro, 1951-2010. Fuente: SMN (2011).

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

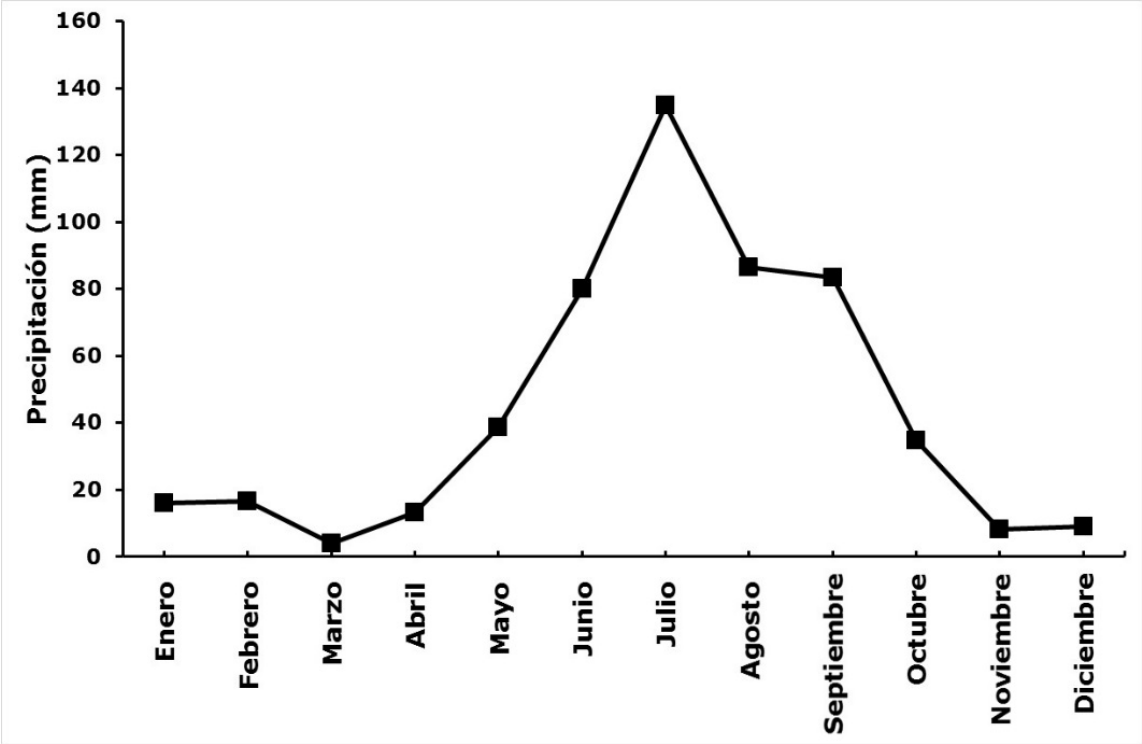

Figura 3. Comportamiento de la precipitación media mensual del valle de Querétaro, 1951-2020. Fuente: SMN (2011).

Metodología

Se recolectaron muestras de lluvia de septiembre de 2017 a julio de 2021 acumuladas mensualmente, utilizando un colector de agua de lluvia RS2 PALMEX (Figura 4), el cual permite tomar muestras mensuales sin

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

evaporación ni fraccionamiento (IAEA, 2002). Las muestras se filtraron usando membranas de celulosa de 0.45 µm, y se envasaron en botellas de polietileno de alta densidad con tapas de inserciones cónicas y poliseal.

Figura 4. Colector de agua de lluvia RS2 PALMEX.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Los análisis de isótopos estables se realizaron en el laboratorio de hidrología isotópica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), utilizando analizadores de isótopos de agua láser Picarro L2110-i y Los Gatos Research LWIA-45EP. La precisión analítica es de ± 0.5 ‰ para δ^2H y ± 0.13 ‰ para $\delta^{18}O$.

El colector se localiza en las instalaciones del Servicio Meteorológico Nacional de Querétaro, cuyas coordenadas son 20° 34′ 13″ norte, 100° 22′ 11″ oeste, y altitud de 1 820 msnm.

Resultados

A las muestras de lluvia que se recolectaron de septiembre de 2017 a julio de 2021 se les determinó su contenido de isótopos estables. Los valores de $\delta^{18}O$ ‰ (VSMOW) y δ^2H ‰ (VSMOW) se muestran en la Tabla 1. Los rangos de $\delta^{18}O$ comprenden de -0.5 ‰ a -15.5 ‰, con un promedio de -7.77 ‰; los rangos de δ^2H comprenden de 0.3 ‰ a -111.8 ‰, con un promedio de -52.5 ‰.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tabla 1. Composición isotópica mensual de la precipitación en el valle de Querétaro en el periodo septiembre 2017-julio 2021.

Colector	Latitud N	Longitud W	Altitud (msnm)	Fecha de muestreo	$\delta^{18}O$ (‰) VSMOW	$\delta^{2}H$ (‰) VSMOW	Exceso-d	Precipitación (mm)
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Septiembre, 2017	-11.27	-78.1	12.1	105
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Febrero, 2018	-2.90	-20.0	3.2	7.68
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Abril, 2018	-1.35	-6.9	3.9	4.19
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Mayo, 2018	-3.16	-12.3	13.0	57.29
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Junio, 2018	-12.33	-89.0	9.6	229.31
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Julio, 2018	-3.13	-17.90	7.1	41.22
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Agosto, 2018	-7.30	-51.70	6.7	101.93
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Septiembre, 2018	-7.80	-51.30	11.1	98.51
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Octubre, 2018	-7.61	-49.70	11.2	28.64
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Noviembre, 2018	-9.09	-62.60	10.1	44.71
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Mayo, 2019	-0.5	0.30	4.0	23.75
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Junio, 2019	-9.3	-58.90	15.5	141.13
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Julio, 2019	-6.6	-38.30	14.1	43.32
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Agosto, 2019	-15.5	-111.80	12.0	75.0
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Octubre, 2019	-13.2	-96.20	9.6	122.27
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Noviembre, 2019	-8.9	-65.30	5.6	0.63
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Diciembre, 2019	-7.5	-48.18	12.1	2.79
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Enero, 2020	-7.5	-47.50	12.1	13.97
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Febrero, 2020	-8.4	-50.40	16.7	44.71
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Mayo, 2020	-5.4	-31.50	11.9	23.75
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Junio, 2020	-5.1	-27.90	13.1	154.06
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Julio, 2020	-10.41	-77.6	5.7	62.04
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Agosto, 2020	-11.62	-83.9	9.1	78.95
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Septiembre, 2020	-7.19	-50.2	7.3	49.61
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Octubre, 2020	-6.18	-48.8	0.6	9.08
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Enero, 2021	-6.43	-44.40	7.0	17.47
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Mayo, 2021	-4.72	-23.60	14.2	84.54
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Junio, 2021	-13.61	-95.40	13.5	43.32
Querétaro	20.56342	-100.36944	1 902	Julio, 2021	-11.55	-83.00	9.4	83.84

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Con los datos se elaboró la gráfica de la relación $\delta^{18}O$ ‰ (VSMOW) *versus* $\delta^{2}H$ ‰ (VSMOW) (Figura 5). Por medio de una regresión lineal de mínimos cuadrados de los datos isotópicos se determinó la línea de agua meteórica del valle de Querétaro, $\delta^{2}H = 7.65\ \delta^{18}O + 6.97$, con $r^2 = 0.9829$.

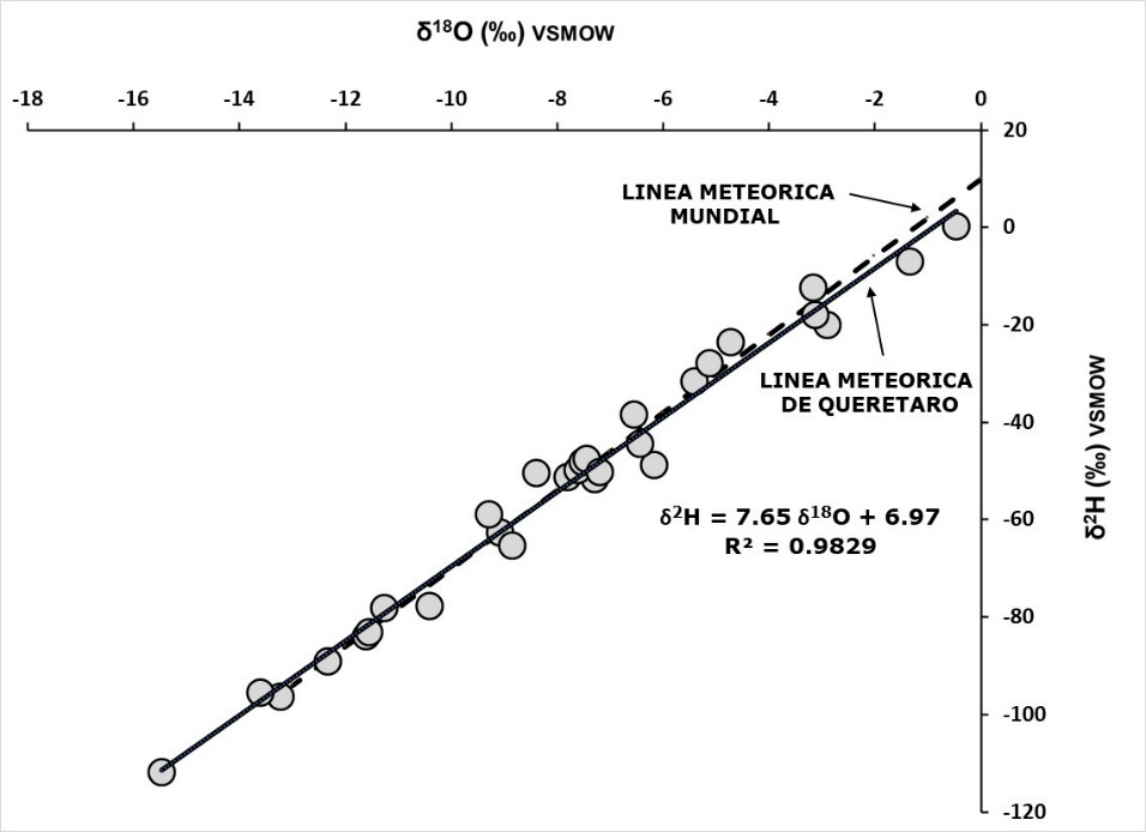

Figura 5. Línea de agua meteórica del valle de Querétaro.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Discusión

Temporada de sequía

Durante el periodo de diciembre a mediados de mayo, la escasa precipitación que se produce es afectada por evaporación secundaria. También se le conoce como "evaporación bajo la nube", pues es la evaporación que sufren las gotas de lluvia en su descenso desde las nubes hasta el suelo. Al caer a través de una columna de aire seco se produce fraccionamiento cinético de las gotas de lluvia (Stewart, 1975; Dansgaard 1964). El fraccionamiento produce enriquecimiento de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ en eventos de lluvia ligera, o al comienzo de una tormenta en atmósferas áridas (Peng, Mayer, Harris, & Krouse, 2007). En eventos de lluvia muy fuerte o de larga duración, la columna de aire bajo las nubes se satura y el proceso de evaporación secundaria se detiene.

En la Tabla 2 se presentan tres rangos de precipitación: sus valores promedio de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$; la pendiente y el intercepto de la correlación $\delta^{18}O$-$\delta^{2}H$, y el exceso de deuterio (d). La tabla muestra que los valores de la pendiente, del intercepto y del exceso-d dependen del rango de precipitación. La lluvia superior a 70 mm presenta los mayores valores de pendiente e intercepto. Conforme la precipitación decrece, los valores de

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

la pendiente decrecen de 8.21 a 7.22, y los del intercepto de 13.26 a 2.94. Esta tendencia indica que la composición isotópica de la lluvia ligera es afectada por evaporación secundaria.

Tabla 2. Valores de $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, Exceso-d, y parámetros de la correlación $\delta^{18}O$-$\delta^{2}H$ para diferentes rangos de precipitación.

Precipitación rango mm	**δ^{18} O ‰**	**δ^{2} H ‰**	**$\delta^{18}O - \delta^{2}H$**		**Exceso de deuterio d**
			Pendiente	**Intercepto**	
0-30	-5.42	-36.2	7.22	2.94	7.16
30-70	-7.69	-50.6	7.89	10.07	10.92
> 70	-9.98	-68.7	8.21	13.26	11.14

Durante la evaporación acontece un exceso de deuterio (H^2) relativo al ^{18}o en el vapor. Esto se debe a la diferencia en el peso de una molécula de agua que contiene deuterio ($H^1H^2O^{16}$ = 19 g/mol) y una que contiene oxígeno-18 ($H^1H^1O^{18}$ = 20 g/mol).

El exceso de deuterio (d) se define como d = $\delta^{2}H$-8*$\delta^{18}O$. El valor del exceso-d de la línea meteórica mundial (LMM) es 10 (Dansgaard, 1964).

Después de la evaporación de un cuerpo de agua superficial (o una gota de lluvia), el agua remanente tendrá valores de exceso de deuterio menores de 10, mientras que el vapor que se produce tendrá valores de exceso de deuterio mayores a 10, en un proceso como se muestra en la

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Figura 6 (Victoria, Martinelli, Mortatti, & Richey, 1991). Es decir, la evaporación decrece el exceso de deuterio, mientras que la humedad reciclada lo incrementa (Froehlich *et al.,* 2008).

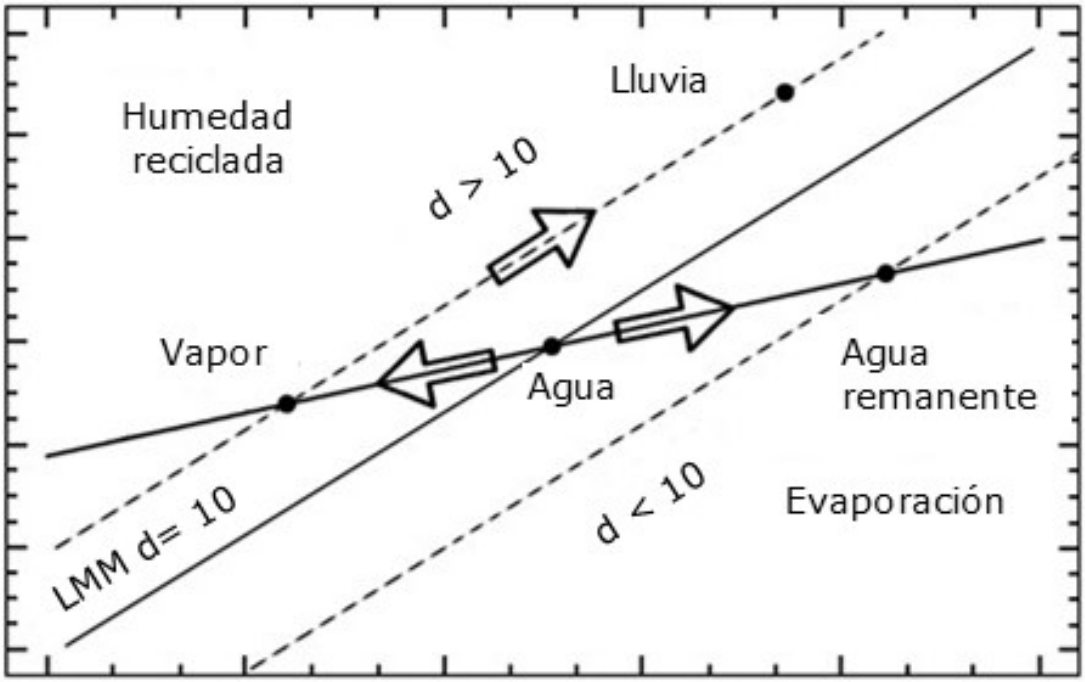

Figura 6. Evolución isotópica del agua sometida a evaporación (Victoria *et al*., 1991; ©The Royal Swedish Academy of Sciences. Utilizado con permiso).

Como se puede observar en la Tabla 2, el exceso de deuterio de las precipitaciones menores a 30 mm es inferior al de la LMM ($d_{<30}$ = 7.16 < d_{LMM} = 10), lo cual indica que sufrieron evaporación. El exceso-d de las

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

precipitaciones mayores a 30 mm es similar al de la LMM, lo cual indica que estas muestras no se evaporaron.

En la Figura 7 y Figura 8 se observa que los valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ son enriquecidos en la temporada de estiaje y empobrecidos en la temporada de lluvias.

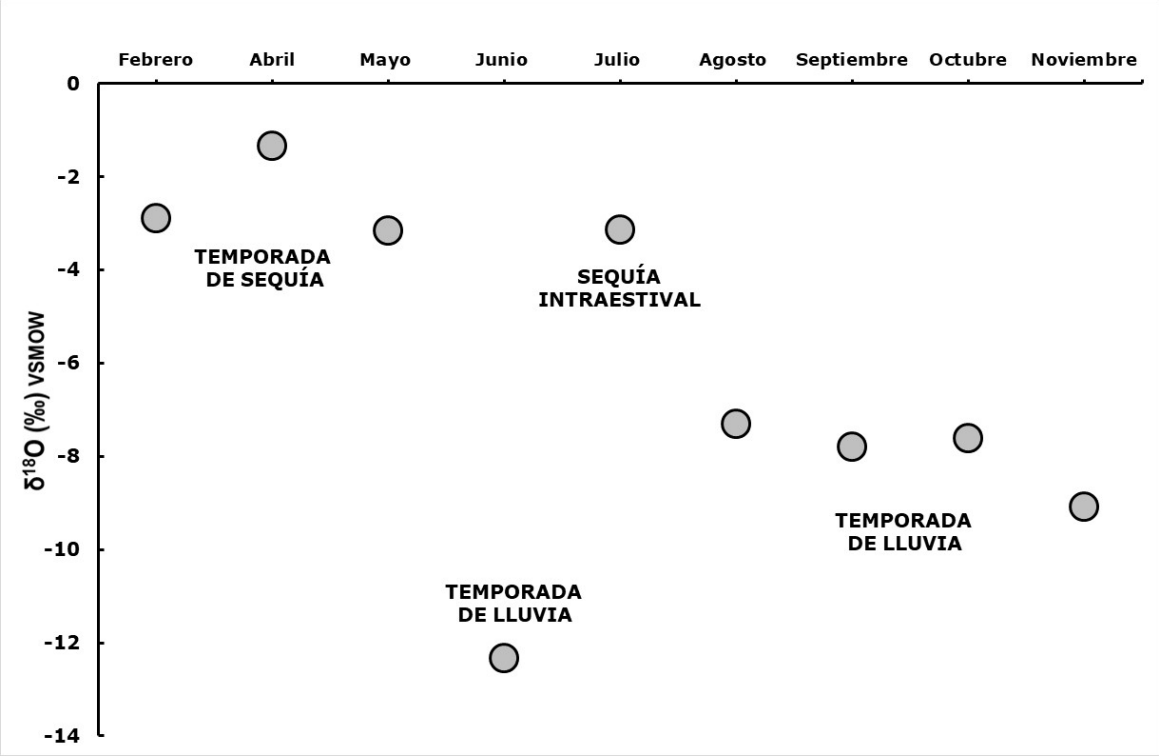

Figura 7. Valores mensuales de $\delta^{18}O$ de la lluvia durante el año 2018.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

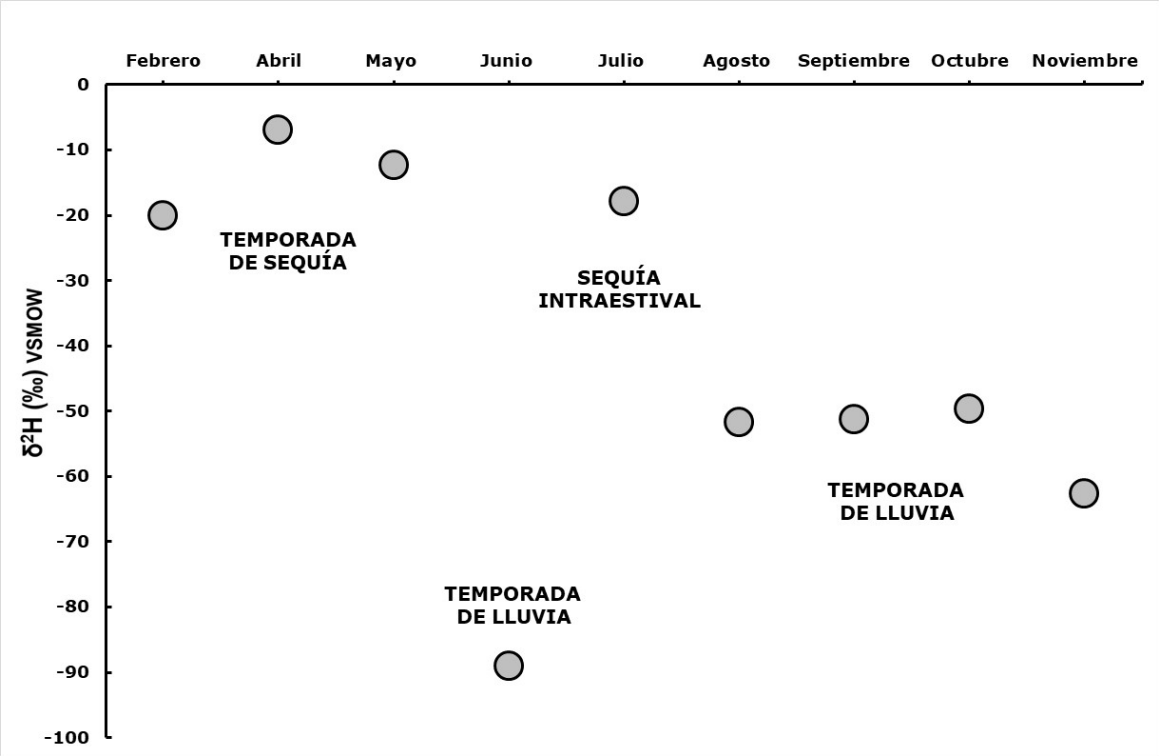

Figura 8. Valores mensuales de δ^2H de la lluvia durante el año 2018.

Pérez-Quezadas, Adams, Sánchez-Murillo, Lagunes y Rodríguez-Castañeda (2021) en su estudio del monzón de Norteamérica en la cuenca del río Sonora (noroeste de México), también encontró una correlación entre la cantidad de lluvia y el exceso de deuterio (Figura 9).

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

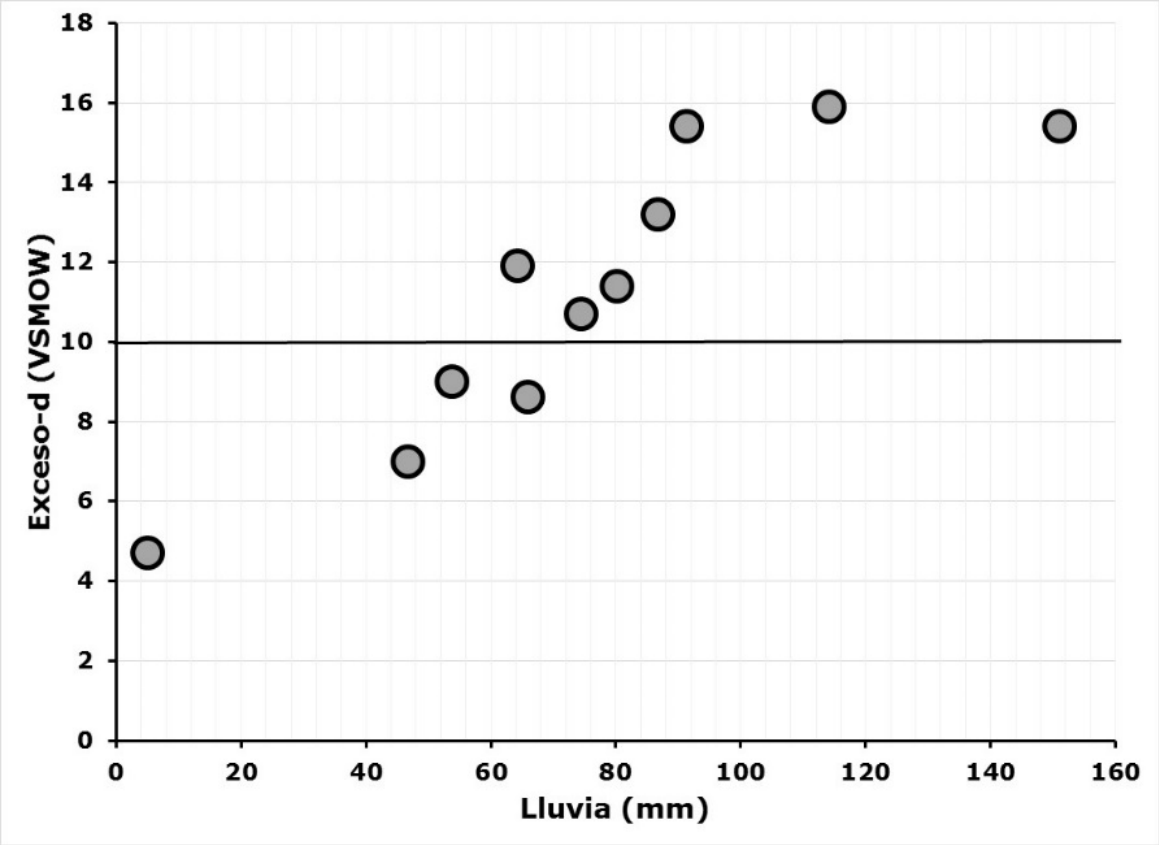

Figura 9. Relación entre la cantidad de lluvia y exceso de deuterio en la cuenca del río Sonora (noroeste de México) en 2018 (datos obtenidos de Pérez-Quezadas *et al*., 2021).

Temporada de lluvias

En esta temporada, los vientos alisios del norte que transportan humedad del golfo de México y los vientos alisios del sur que transportan humedad del océano Pacífico convergen en el trópico de México, generando

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

corrientes ascendentes que producen abundantes precipitaciones al condensarse la humedad (Jáuregui-Ostos, 2003; Waliser & Jiang, 2014). A esta región se le denomina zona de convergencia intertropical (Figura 10).

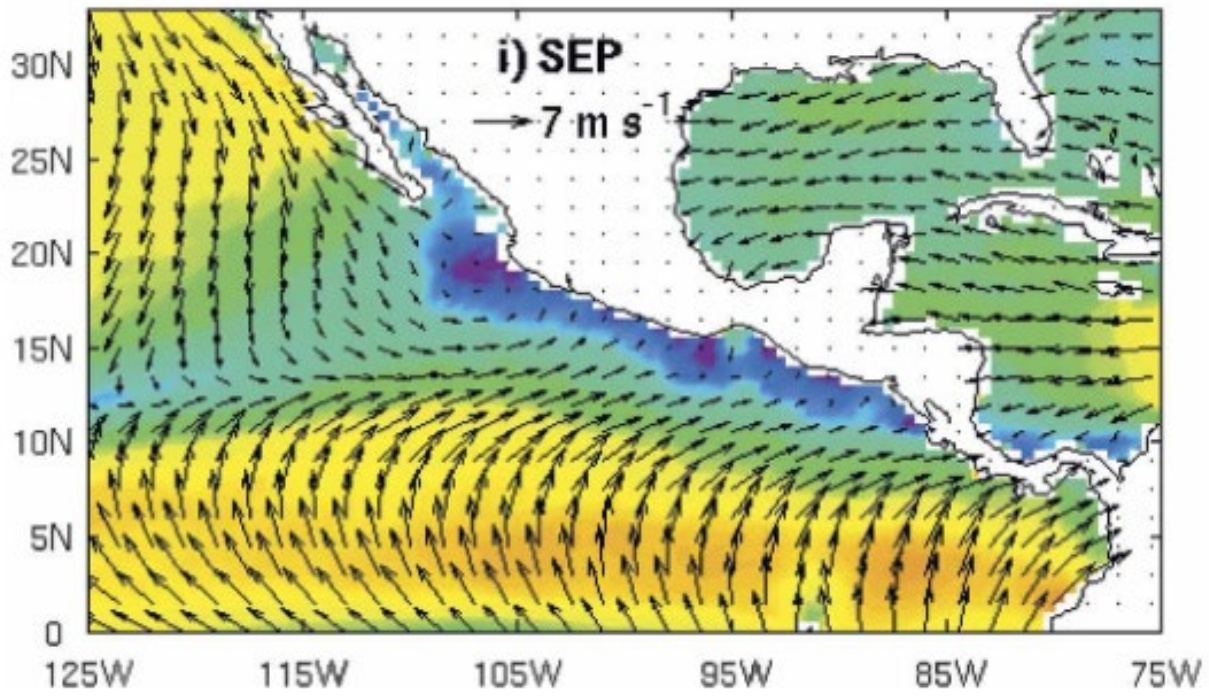

Figura 10. Campo de velocidades de viento de bajo nivel (m/s) en septiembre (Romero-Centeno, Zavala-Hidalgo, & Raga, 2007; ©American Meteorological Society. Utilizado con permiso).

La condensación inicial del vapor marino presenta valores enriquecidos en isótopos pesados (Araguás-Araguás, Froehlich, & Rozanski, 2000). Conforme el vapor marino es transportado hacia el

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

continente y produce lluvia, los valores de las $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ decrecen debido a la destilación de los isótopos pesados (Rozanski, Araguás-Araguás, & Gonfiantini, 1993). Esto se conoce como efecto de continentalidad.

El contenido de isótopos pesados de la lluvia decrece con la altitud. Conforme las masas de vapor ascienden sobre las montañas se enfrían por expansión adiabática, condensándose y produciendo lluvias (Gonfiantini, Roche, Olivry, Fontes, & Zuppi, 2001). Cuando ocurre la lluvia inicial, las moléculas de agua que contienen isótopos pesados condensan de manera preferente, empobreciendo el vapor remanente en isótopos pesados. En consecuencia, la segunda lluvia será más empobrecida que la primera, y así sucesivamente (Bony, Risi, & Vimeux, 2008). Es decir, conforme asciende el vapor y produce lluvia, los valores de las $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ decrecen debido a la destilación de los isótopos pesados (Scholl, Shanley, Zegarra, & Coplen, 2009; Scholl & Murphy, 2014). Esto se conoce como efecto de altitud.

Lachniet y Patterson (2009) calcularon para la región norte de Centroamérica el efecto de continentalidad para la $\delta^{18}O$, el cual es de -0.69 ‰ por cada 100 km desde la costa. La distancia entre el valle de Querétaro y el Golfo de México es de ~350 km, por lo cual la $\delta^{18}O$ decrece -2.2 ‰.

Poage y Chamberlain (2001) calcularon, con base en un estudio que abarcó 68 cadenas montañosas alrededor del mundo, el factor de altitud para la $\delta^{18}O$. Este factor es de -2.8 ‰ por 1 km. La altitud del valle de Querétaro es de 1.85 km, por lo cual la $\delta^{18}O$ decrece -5.2 ‰.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

El valor promedio de $\delta^{18}O$ de la lluvia en el puerto de Veracruz es -4 ‰ (IAEA/WMO, 1998).

Sumando el efecto de altitud y continentalidad, y asumiendo que el contenido isotópico de la condensación inicial del vapor marino es similar al de Veracruz, el valor de la $\delta^{18}O$ = -4 ‰ -2.2 ‰ -5.2 ‰ = -11.4 ‰. Éste es el valor de la $\delta^{18}O$ de la lluvia en la base de la nube, en el valle de Querétaro.

México se ubica entre las regiones ciclogenéticas del Atlántico occidental y el Pacífico nororiental (Gray, 1979), por lo cual recibe abundantes lluvias de los ciclones tropicales que arriban al país (Breña-Naranjo, Pedrozo-Acuña, Pozos-Estrada, Jiménez-López, & López-López, 2015). Los ciclones del Pacífico se originan en la zona del golfo de Tehuantepec (Reyes & Mejía-Trejo, 1991), mientras que los del Atlántico se generan en la sonda de Campeche o el Caribe oriental. En estos sistemas de escala sinóptica, las masas de vapor ascienden a gran altura, condensándose y produciendo lluvias muy empobrecidas en isótopos pesados debido al efecto de altitud. Un ejemplo de ello fue el huracán Bud y la tormenta tropical Carlota, los cuales ocasionaron intensas lluvias en el centro del país en junio de 2018 (SMN, 2018). González-Hita *et al*. (2021) reportaron para el huracán Bud valores de $\delta^{18}O$ = -13.48 y $\delta^{2}H$ = -97.8.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Conclusiones

Este estudio presenta la caracterización de la composición isotópica ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, Exceso-d) del agua meteórica ocurrida en el valle de Querétaro de septiembre de 2017 a julio de 2021. Con los datos isotópicos se elaboró la gráfica de la correlación $\delta^{18}O$-$\delta^{2}H$, y se determinó la línea de agua meteórica del valle de Querétaro (LAMVQ), $\delta^{2}H = 7.65\ \delta^{18}O + 6.97$. La LAMVQ tiene una pendiente y un intercepto menor al de la línea meteórica mundial.

Los datos muestran que la pendiente e intercepto de la correlación $\delta^{18}O$-$\delta^{2}H$ de las precipitaciones abundantes (> 30 mm) son similares al de la LMM. El exceso de deuterio no revela evaporación secundaria en estas precipitaciones. Por otro lado, la pendiente e intercepto de la correlación $\delta^{18}O$-$\delta^{2}H$ de las precipitaciones ligeras (< 30 mm) son menores al de la LMM. El exceso de deuterio muestra evaporación secundaria en estas precipitaciones. Se concluye que la LAMVQ tiene una pendiente e intercepto menor al de la LMM debido a evaporación secundaria de las precipitaciones pequeñas. Con base en estos resultados, se especula que las líneas de agua meteóricas de las regiones semiáridas y áridas de México estarán afectadas por evaporación secundaria.

La línea de agua meteórica del valle de Querétaro puede fungir como una herramienta muy importante para estudiar el origen y la dinámica del agua superficial y subterránea. En el caso concreto del acuífero del valle

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

de Querétaro puede coadyuvar a determinar: 1) las zonas de recarga; 2) el origen del nitrato presente en el agua subterránea; 3) la relación con el acuífero de Los Apaseos, Guanajuato, y 4) el impacto de pozos de recarga.

Agradecimientos

La Red Nacional de Monitoreo de la Composición Isotópica de la Precipitación Pluvial en México es una colaboración del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, el Servicio Meteorológico Nacional, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, y el Organismo Internacional de Energía Atómica.

Referencias

Aguilar-Ramírez, C. F., Camprubí, A., Fitz-Díaz, E., Cienfuegos-Alvarado, E., & Morales-Puente, P. (2017). Variación en la composición isotópica del agua meteórica a lo largo de la sección centro-noreste de la Sierra Madre Oriental. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(2), 447-463. Recuperado de https://doi.org/10.18268/bsgm2017v69n2a9

Araguás-Araguás, L., Froehlich, K., & Rozanski, K. (2000). Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. *Hydrological Processes*, 14(8), 1341-1355.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Bony, S., Risi, C., & Vimeux, F. (2008). Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}O$ and δD) of precipitation and water vapor in the tropics: 1. Radiative-convective equilibrium and tropical ocean-global atmosphere-coupled ocean-atmosphere response experiment (TOGA-coare) simulations. *Journal of Geophysical Research*, 113(D19). Recuperado de https://doi.org/10.1029/2008jd009942

Bowen, G. J., & Good, S. P. (2015). Incorporating water isoscapes in hydrological and water resource investigations. *Wiley Interdisciplinary Reviews*, 2(2), 107-119. Recuperado de https://doi.org/10.1002/wat2.1069

Breña-Naranjo, A. J., Pedrozo-Acuña, A., Pozos-Estrada, O., Jiménez-López, S. A., & López-López, M. R. (2015). The contribution of tropical cyclones to rainfall in Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*, 83-84, 111-122. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.011

Cejudo, E., Acosta-González, G., & Leal-Bautista, R. (2021). Regional meteoric water line of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geoscience Data Journal*. Recuperado de https://doi.org/10.1002/gdj3.123

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Querétaro*. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Cortés, A., & Farvolden, R. N. (1989). Isotope studied of precipitation and groundwater in the Sierra de Las Cruces, Mexico. *Journal of Hydrology*, 107(1-4), 147-153. Recuperado de https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90055-3

Cortés, A., Durazo, J., & Farvolden, R. N. (1997). Studies of isotopic hydrology of the basin of Mexico and vicinity: Annotated bibliography and interpretation. *Journal of Hydrology*, 198(1-4), 346-376. Recuperado de https://doi.org/10.1016/s0022-1694(96)03273-8

Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), 436-468. Recuperado de https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993

Eastoe, C. J., Hess, G., & Mahieux, S. (2014). Identifying recharge from tropical cyclonic storms, Baja California Sur, Mexico. *Groundwater*, 53(S1), 133-138. Recuperado de https://doi.org/10.1111/gwat.12183

Froehlich, K., Kralik, M., Papesch, W., Rank, D., Scheifinger, H., & Stichler, W. (2008). Deuterium excess in precipitation of alpine regions-moisture recycling. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 44(1), 61-70. Recuperado de https://doi.org/10.1080/10256010801887208

Gonfiantini, R., Roche, M.-A., Olivry, J.-C., Fontes, J.-C., & Zuppi, G. M. (2001). The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chemical Geology*, 181(1-4), 147-167. Recuperado de https://doi.org/10.1016/s0009-2541(01)00279-0.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

González-Hita, L. G., Mejía-González, M. A., Martinez-Carteño, B., Aparicio-González, J. C., & Flores-Mañón, D. (2021). Isotopic composition of rainfall in Baja California Sur, México. *International Journal of Hydrology*, 5(3), 93-100. Recuperado de https://doi.org/10.15406/ijh.2021.05.00271

Gray, W. M. (1979). Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation. In: Shaw, D. B. (ed.). *Meteorology over the tropical oceans* (155-218). Bracknell, UK: Royal Meteorological Society, James Glaisher House, Grenville Place.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1997). *Querétaro, estado de Querétaro. Cuaderno estadístico municipal*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IAEA, International Atomic Energy Agency. (2002). A new device for montly rainfall sampling for GNIP. *Water and Environment Newsletter, International Atomic Energy Agency*. (16) Special Issue on the Global Network of Isotopes in Precipitation, 5.

IAEA/WMO, International Atomic Energy Agency/World Meteorological Organization. (1998). *Global network for isotopes in precipitation. The GNIP Database. Release 3*. Vienna, Austria/ Geneva, Switzerland: International Atomic Energy Agency/World Meteorological Organization.

Jáuregui-Ostos, E. (2003). Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera. *Investigaciones Geográficas*, 50, 121-143.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Lachniet, M. S., & Patterson, W. P. (2009). Oxygen isotope values of precipitation and surface waters in Northern Central America (Belize and Guatemala) are dominated by temperature and amount effects. *Earth and Planetary Science Letters*, 284(3-4), 435-446. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.05.010

Lases-Hernandez, F., Medina-Elizalde, M., Burns, S., & DeCesare, M. (2019). Long-term monitoring of drip water and groundwater stable isotopic variability in the Yucatán Peninsula: Implications for recharge and speleothem rainfall reconstruction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 246, 41-59. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.11.028

Morales-Casique, E., Escolero, O., & Arce, J. (2014). Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), 64-75.

Ouysse, S., Wehncke, E. V., & Carrillo-Rivera, J. J. (2018). Investigating regional groundwater flow systems in Baja California Central Desert Region. *International Journal of Hydrology*, 2(1). Recuperado de https://doi.org/10.15406/ijh.2018.02.00057

Ortega-Guerrero, A., Cherry, J. A., & Aravena, R. (1997). Origin of pore water and salinity in the Lacustrine Aquitard overlying the Regional Aquifer of Mexico City. *Journal of Hydrology*, 197(1-4), 47-69. Recuperado de https://doi.org/10.1016/s0022-1694(96)03280-5

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Putman, A. L., Fiorella, R. P., Bowen, G. J., & Cai, Z. (2019). A global perspective on local meteoric water lines: Meta-analytic insight into fundamental controls and practical constraints. *Water Resources Research*, 55(8), 6896-6910. Recuperado de https://doi.org/10.1029/2019wr025181

Peng, H., Mayer, B., Harris, S., & Krouse, H. R. (2007). The influence of below-cloud secondary effects on the stable isotope composition of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 59(4), 698-704. Recuperado de https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00291.x

Pérez-Quezadas, J., Adams, D., Sánchez-Murillo, R., Lagunes, A. J., & Rodríguez-Castañeda, J. L. (2021). Isotopic variability ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ and D-excess) during rainfall events of the North American monsoon across the Sonora River Basin, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 102928. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102928

Poage, M. A., & Chamberlain, P. (2001). Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: Considerations for studies of Paleoelevation Change. *American Journal of Science*, 301(1), 1-15. Recuperado de https://doi.org/10.2475/ajs.301.1.1

Reyna, T. (1970). Aspectos climáticos del estado de Querétaro. *Investigaciones geográficas*, 3, DOI: https://doi.org/10.14350/rig.58850

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Reyes, S., & Mejía-Trejo, A. (1991). Tropical perturbations in the Eastern Pacific and the precipitation field over north-western Mexico in relation to the ENSO phenomenon. *International Journal of Climatology*, 11(5), 515-528. Recuperado de https://doi.org/10.1002/joc.3370110505

Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., & Gonfiantini, R. (1993). Isotopic patterns in modern global precipitation. *Geophysical Monograph Series*, 78, 1-36. DOI: 10.1029/gm078p0001

Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., & Raga, G. B. (2007). Midsummer gap winds and low-level circulation over the Eastern Tropical Pacific. *Journal of Climate*, 20(15), 3768-3784. Recuperado de https://doi.org/10.1175/jcli4220.1

Sánchez-Murillo, R., Durán-Quesada, A. M., Esquivel-Hernández, G., Rojas-Cantillano, D., Birkel, C., Welsh, K., Sánchez-Llull, M., Alonso-Hernández, C. M., Tetzlaff, D., Soulsby, C., Boll, J., Kurita, N., & Cobb, K. M. (2019). Deciphering key processes controlling rainfall isotopic variability during extreme tropical cyclones. *Nature Communications*, 10(1). Recuperado de https://doi.org/10.1038/s41467-019-12062-3

Schotterer, U., Oldfield, F., & Froehlich, K. (1996). *GNIP Global Network for Isotopes in Precipitation*. Bern, Switzerland: Laederach AG.

Scholl, M. A., Shanley, J. B., Zegarra, J. P., & Coplen, T. B. (2009). The stable isotope amount effect: New insights from Nexrad Echo Tops, Luquillo Mountains, Puerto Rico. *Water Resources Research*, 45(12). Recuperado de https://doi.org/10.1029/2008wr007515

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Scholl, M. A., & Murphy, S. F. (2014). Precipitation isotopes link regional climate patterns to water supply in a tropical mountain forest, eastern Puerto Rico. *Water Resources Research*, 50(5), 4305-4322. Recuperado de https://doi.org/10.1002/2013wr014413

SMN, Servicio Meteorológico Nacional. (2018). *Reporte del clima en México. Junio 2018.* Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional.

SMN, Servicio Meteorológico Nacional. (2011). *Normales Climatológicas del periodo de 1951 a 2010*. Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional.

Stewart, M. K. (1975). Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling waterdrops: Applications to atmospheric processes and evaporation of Lakes. *Journal of Geophysical Research*, 80(9), 1133-1146. Recuperado de https://doi.org/10.1029/jc080i009p01133

Victoria, R., Martinelli, L., Mortatti, J., & Richey, J. (1991). Mechanisms of Water Recycling in the Amazon Basin: Isotopic insights. *Ambio*, 20(8), 384-387.

Waliser, D. E., & Jiang, X. (2014). Tropical meteorology and climate: Intertropical convergence zone. In: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (2nd ed.). Amsterdam, The Neverlands: Elsevier.

2023, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)